

На правах рукописи



Журавлёв Александр Сергеевич

**Методы моделирования процессов миграции,
аккумуляции и перераспределения
углеводородов в естественных геологических
неоднородных коллекторах**

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО
«Тюменский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шабаров Александр Борисович

Официальные оппоненты: Баутин Сергей Петрович,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Уральский государственный
университет путей сообщения», заведующий
кафедры Прикладная математика;
Искаков Сергей Наильевич,
кандидат физ.-мат. наук,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный уни-
верситет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», доцент кафедры Теоретиче-
ской физики и прикладной математики.

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный
нефтегазовый университет»

Защита состоится «06» июня 2013 г. в 16 часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.274.14 при ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный
университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре
ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет».

Автореферат разослан «25» апреля 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Е.А.Оленников

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Результат разработки практически любого нефтяного, газового или конденсатного месторождения напрямую зависит от степени достоверности, с которой определена начальная картина насыщения литологической ловушки пластовыми флюидами. В случаях начального неравновесного распределения пластовых флюидов провести такое исследование можно только с учётом моделирования процессов миграции, аккумуляции и перераспределения углеводородов.

При численном физико-математическом моделировании процессов вторичной миграции необходимы масштабные, с точки зрения затрачиваемых вычислительных мощностей, расчёты. Отмеченная потребность в вычислительных мощностях вызвана большими размерностями геологических моделей (10^6 - 10^7 сеточных узлов) и геологическими масштабами времени, характеризующими изучаемые процессы.

Актуальными проблемами в изучении миграции, аккумуляции и перераспределении углеводородов являются методы моделирования этих процессов, экономичные конечно-разностные методы решения соответствующих начально-краевых задач и ориентированные программные комплексы.

Цель диссертационной работы состоит в разработке и апробации экономичных методов решения уравнения параболического типа, известного как уравнение Рапопорта-Лиса, в трёхмерном случае в предположении сегрегационности характера движения в задачах о миграции, аккумуляции и перераспределении углеводородов в неоднородных анизотропных естественных геологических коллекторах.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- разработка и апробация, экономичного численного конечно-разностно-

го метода решения трёхмерного уравнения Рапопорта-Лиса в задачах миграции, аккумуляции и перераспределения углеводородов,

- создание программного комплекса, заключающего в себе предложенный метод и позволяющего проводить моделирование вторичной миграции углеводородов в геологических коллекторах на геологических масштабах времени,
- применений разработанного программного комплекса для исследования задач вторичной миграции углеводородов.

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. сформулировано и доказано предложение, сводящее начально-краевую задачу о равновесной фильтрации несжимаемой двухфазной жидкости в несжимаемой анизотропной среде при действии капиллярных и гравитационных сил к системе соотношений, включающих трёхмерное уравнение Рапопорта-Лиса, описывающее сегрегационное движение,
2. разработаны и апробированы экономичный метод и алгоритмы решения предложенной начально-краевой задачи, позволяющие проводить численные исследования миграции, аккумуляции и перераспределении углеводородов в естественных геологических неоднородных анизотропных коллекторах,
3. проведён ряд численных исследований, позволяющих оценить характерные времена залежеобразования и влияние неоднородности фильтрационно-ёмкостных параметров на картину вторичной миграции углеводородов,

4. предложена постановка и методика решения обратных задач подземной гидродинамики, позволяющих посредством моделирования миграции углеводородов определять насыщенность пластовыми флюидами в межскважинном пространстве.

Практическая значимость. Предложенные в рамках диссертационного исследования методы и алгоритмы позволяют решать задачи противоточной капиллярно-гравитационной пропитки в поровой анизотропной среде при исследовании процессов вторичной миграции углеводородов на геологических масштабах времени. С помощью разработанного программного комплекса можно проводить исследования нефтенакопления и восстановления капиллярно-гравитационного равновесия залежей после разработки, таким образом получая информацию о текущем распределении запасов.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие результаты, соответствующие четырём пунктам паспорта специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по физико-математическим наукам:

Пункт 1: Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

1. Метод математического моделирования процессов миграции и аккумуляции углеводородов основанный на начально-краевой задаче для уравнения Рапопорта-Лиса в трёхмерном случае в допущении сегрегационности характера движения и анизотропии абсолютной проницаемости.

Пункт 3: Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

2. Разработка и апробация экономичного метода и алгоритмов численного

решения описанного уравнения в применении к задачам миграции углеводородов в естественных геологических неоднородных коллекторах.

Пункт 4: Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

3. Программный комплекс Saturation, заключающий в себе разработанные методы и алгоритмы, позволяющий проводить моделирование миграции углеводородов с использованием геолого-физической информации.

Пункт 5: Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

4. Результаты исследований, позволяющие посредством созданного программного комплекса оценить характерные времена формирования залежей углеводородов и выявить влияние неоднородности различных фильтрационно-ёмкостных параметров на картину миграции. Постановка и модельное решение обратной задачи, позволяющей посредством моделирования миграции углеводородов определять насыщенность пластовыми флюидами в межскважинном пространстве.

Таким образом, в соответствии с паспортом специальности 05.13.18 в диссертационной работе представлены оригинальные результаты одновременно из трёх областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

Апробация работы была выполнена на кафедре Механики многофазных систем института Математики, механики и информационных технологий Тюменского государственного университета. Основные положения докладывались на:

- «IV научно-практической конференции молодых учёных и специалистов нефтяной и геолого-разведочной отрасли Ханты-Мансийского автономного округа» (Когалым 2003 г.),
- научных семинарах «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника» под руководством д. т. н., профессора А.Б. Шабарова (ФГБОУ ВПО ТюмГУ 2008, 2010, 2012 г.),
- XIV окружной научно-практической конференции «Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа» (Ханты-Мансийск 2011 г.),
- научном семинаре под руководством д. ф. м. н., академика РАН Р.И. Нигматулина (ФГБОУ ВПО ТюмГУ 2012 г.),
- научном семинаре «Дифференциальные уравнения и их приложения» под руководством д. ф. м. н., профессора С.П. Баутина (ФГБОУ ВПО УрГУПС 2013 г.),
- научном семинаре под руководством д. ф. м. н., профессора А.А. Губайдулина (ИТПМ СО РАН 2013 г.),
- научном семинаре под руководством д. ф. м. н., профессора В.Э. Борзых (ГОУ ВПО ТюмГНГУ 2013 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах, из них 2 статьи - в рецензируемых журналах: [1], [2], 2 статьи - в сборниках трудов конференций и 3 - в фонде программ.

Структура и объем диссертации. Данный документ состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 118 страниц, включая 44 рисунка и 1 таблицу, список цитируемой литературы представлен 123 наименованиями.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава ориентирована на раскрытие необходимых для достоверного моделирования процессов движения пластовых флюидов в поровой естественной геологической среде аспектов механики сплошной среды, геологии и численных методов решения уравнений в частных производных.

В первом подразделе описаны физико-математические аспекты исследуемых в работе классов задач. Приведены основные положения механики жидкости и газа, а также базовые моменты однофазной и многофазной фильтрации сжимаемых и не сжимаемых жидкостей. Отмеченные положения раскрыты в работах Р.И. Нигматулина, К.С. Басниева, В.М. Ентова, Г.И. Баренблатта, С.Н. Закирова, Х. Азиза, Э. Сеттари, З. Чена и др.

Во втором подразделе представлены основы численного интегрирования уравнений в частных производных, развитого из метода конечных разностей. Наглядно описан переход от дифференциального уравнения к системе алгебраических уравнений посредством метода дискретизации, основанного на разложении функций в ряд Тэйлора в окрестностях соседних сеточных узлов¹.

В третьем подразделе приведены геолого-физические основы задач о миграции и аккумуляции углеводородов. Под миграцией и перераспределением углеводородов в геологических коллекторах понимается перемещение пластовых флюидов, имеющих углеводородную природу, под воздействием капиллярных, термодинамических и гравитационных сил в геологических структурах. Аккумуляцией углеводородов называют процесс скопления пластовых

¹ Азис Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. М.: Недра, 1982. 408 с.

флюидов, имеющих углеводородную природу, в геологических ловушках. Геологической ловушкой называется часть природного коллектора, экранируемая непроницаемыми породами таким образом, что способна удерживать пластовые флюиды.

Первичная миграция заключается в перемещении углеводородов сквозь разные геологические пласты. Вторичная миграция заключается в движении углеводородов по проницаемой части одного пласта.

Существующие подходы к решению задач миграции углеводородов и общепринятые концепции представлены в работах Ю.Я. Большакова, С.В. Степанова, И.В. Высоцкого, В.Ф. Линецкого, С.Г. Неручева, И.И. Нестерова, Б. Тиссо, Д. Вельде, Х.М. Хелсета, Д. Зенга и др.

Сложность фильтрационного движения, посредством которого происходит перемещение пластовых флюидов единой фазой в проницаемой части геологической системы, приводит к необходимости использования физико-математической модели, содержащей ряд эмпирических соотношений: функции относительных фазовых проницаемостей, абсолютная проницаемость, функция разности давлений в фазах.

Во второй главе произведена постановка трёхмерной задачи о капиллярно-гравитационной сегрегации, показаны предложенные методы её решения и их обоснование.

В первом подразделе приведена использованная автором при создании физико-математической модели замкнутая система уравнений и связей (1-8), описывающая процесс фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости при наличии объёмных и поверхностных сил². В общем виде охарактеризованная система уравнений справедлива для ортогональной системы координат.

² Chen Z., Huan G., Ma Y. Computational Methods for Multiphase Flows in Porous Media. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006. 550 pp.

$$v_i^{(n)} S^{(n)} m = -\frac{k_{ij} f^{(n)}}{\mu^{(n)}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(P^{(n)} - \rho^{(n)} g_k x_k \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial S^{(n)}}{\partial t} + \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(v_i^{(n)} S^{(n)} m + \widehat{v}_i^{(n)} S^{(n)} m \right) = 0, \quad (2)$$

$$P^{(1)} - P^{(2)} = L, \quad (3)$$

$$S^{(1)} + S^{(2)} = 1, \quad (4)$$

$$\chi_i v_i^{(n)} = \chi_i \widetilde{v}_i^{(n)} \text{ на границах,} \quad (5)$$

$$\oint_G \chi_i \left(\widetilde{v}_i^{(1)} S^{(1)} m + \widetilde{v}_i^{(2)} S^{(2)} m \right) dG + \int_V \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\widehat{v}_i^{(1)} S^{(1)} m + \widehat{v}_i^{(2)} S^{(2)} m \right) dV = 0, \quad (6)$$

$$P^{(1)}(x_1, x_2, x_3, 0) = P_{\text{нач}}^{(1)}(x_1, x_2, x_3), \quad (7)$$

$$S^{(1)}(x_1, x_2, x_3, 0) = S_{\text{нач}}^{(1)}(x_1, x_2, x_3), \quad (8)$$

где верхние индексы в скобках обозначают фазу; m - пористость; $S^{(n)}$ - насыщенность; $v_i^{(n)}$ - скорость движения; k_{ij} - тензор абсолютной проницаемости; $P^{(n)}$ - давление; $L(S^{(1)}, m)$ - разность давлений в фазах, обусловленная наличием капиллярных сил; $f^{(n)}(S^{(1)}, m)$ - относительная фазовая проницаемость; $\mu^{(n)}$ - динамическая вязкость; g_k - вектор, описывающий объёмные силы; V - объём исследуемой области; G - замкнутая поверхность, ограничивающая объём V ; χ_i - нормаль к поверхности G ; $\widehat{v}_i^{(n)} = \widehat{v}_i^{(n)}(x_1, x_2, x_3, t)$ - скорость источника (стока), удовлетворяющая уравнению (6); $\widetilde{v}_i^{(n)} = \widetilde{v}_i^{(n)}(x_1, x_2, x_3, t)$ - скорость потока на границах, удовлетворяющая уравнению (6); $P_{\text{нач}}^{(1)}$ - начальное давление в первой фазе; $S_{\text{нач}}^{(1)}$ - начальная насыщенность первой фазой.

Предлагаемый подход исследования изучаемых классов задач основан на использовании уравнения Рапопорта-Лиса³ в трёхмерном случае при до-

³ Rapoport L., Leas W. Properties of Linear Waterflood // AIME Transactions. 1953. Vol. 198. Pp. 139-148.

пущении, заключающемся в учёте только сегрегационных процессов. Справедливость такого распространения показана путём доказательства нижеследующего предложения 1.

Предложение 1. *При сегрегационном равновесном фильтрационном движении двухфазной несжимаемой жидкости в несжимаемой анизотропной поровой среде, описываемом начально-краевой задачей, представленной системой соотношений (1-8), справедливы соотношения (9, 13), устанавливающие ограничения на задание скоростей источников (стоков) и потоков на границе соответственно, а также уравнение (10), замыкаемое соответствующими начальными и граничными условиями (12, 14):*

$$\widehat{v}_i^{(1)} S^{(1)} m + \widehat{v}_i^{(2)} (1 - S^{(1)}) m = 0, \quad (9)$$

$$m \frac{\partial S^{(1)}}{\partial t} + (\rho^{(1)} - \rho^{(2)}) \frac{\partial (\psi k_{ij} g_j)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\psi k_{ij} \frac{\partial L}{\partial x_j} + \widehat{v}_i^{(1)} S^{(1)} m \right) = 0, \quad (10)$$

где

$$\psi = \frac{\frac{f^{(1)}}{\mu^{(1)}} \frac{f^{(2)}}{\mu^{(2)}}}{\frac{f^{(1)}}{\mu^{(1)}} + \frac{f^{(2)}}{\mu^{(2)}}}. \quad (11)$$

$$S^{(1)}(x_1, x_2, x_3, 0) = S_{нач}^{(1)}(x_1, x_2, x_3). \quad (12)$$

$$\widetilde{v}_i^{(1)} S^{(1)} m + \widetilde{v}_i^{(2)} (1 - S^{(1)}) m = 0, \quad (13)$$

$$\chi_i k_{ij} \frac{\psi}{S^{(1)} m} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(L - (\rho^{(1)} - \rho^{(2)}) g_k x_k \right) = \chi_i \widetilde{v}_i^{(1)} \text{ на границах.} \quad (14)$$

Выражение (10) представляет собой нелинейное параболическое однородное уравнение, замыкаемое соответствующим начальным (12) и краевым (8) условиями. При $\widehat{v}_i^{(1)} S^{(1)} m = 0$ в области определения отсутствуют источники, в случае $\widetilde{v}_i^{(1)} S^{(1)} m = 0$ на границах выполняется условие не протекания.

Во втором подразделе идёт речь о капиллярно-гравитационном равновесии. Интегрирование однородного уравнения (10) в предположении коллинеарности оси координат x_1 и вектора ускорения свободного падения g_k , а также с учётом только наличествующих капиллярных и гравитационных сил, приводит к выражению

$$L \left(S^{(1)}, m \right) = \left(\rho^{(2)} - \rho^{(1)} \right) g x_1 + const, \quad (15)$$

где g - модуль ускорения свободного падения.

В третьем подразделе описан использованный метод дискретизации уравнения (10) и проведена апробация предложенных методов и алгоритмов решения полученных конечно-разностных уравнений.

В основе предложенного автором алгоритма нахождения решения лежат уравнения:

$$F_i = -\psi k_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(L - \left(\rho^{(1)} - \rho^{(2)} \right) g_k x_k \right), \quad (16)$$

$$\frac{\partial S^{(1)}}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \xi^{(1)}, \quad (17)$$

$$\text{где } \xi^{(1)} = -\frac{\partial \left(\widehat{v}_i^{(1)} S^{(1)} m \right)}{\partial x_i}, \quad (18)$$

следующие из (10).

Переход от исчисления бесконечно малых элементов, используемого в механике сплошной среды, к исчислению конечных элементов произведён при помощи метода разложения в ряд Тэйлора⁴. Таким образом аппроксимация системы уравнений (16, 17) приводится к виду:

$$F_{i[r,w,d,h]} = - \sum_{j=1}^3 \psi_{[r,w,d,h]} k_{ij[r,w,d]} \frac{\Delta L_{[r,w,d,h]} + \tilde{g} \Delta x_{1[r,w,d]}}{\Delta x_{j[r,w,d]}}, \quad (19)$$

$$S_{[r,w,d,h+1]}^{(1)} = S_{[r,w,d,h]}^{(1)} + \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta t_{[h]}}{m_{[r,w,d]}} \frac{\Delta F_{i[r,w,d,h]}}{\Delta x_{i[r,w,d]}} + \xi_{[r,w,d,h]}^{(1)}, \quad (20)$$

⁴ Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

где $[r, w, d, h]$ - номера конечных элементов: первые три - пространственные, четвёртый - временной, а $\tilde{g} = -(\rho^{(1)} - \rho^{(2)})g$. Конечно-разностная сетка, состоящая из конечных элементов, является равномерной и имеет регулярную структуру. Ось x_1 коллинеарна ускорению свободного падения g_k , что позволяет скалярное произведение $g_k x_k$ записывать как $g x_1$. Фильтрационные и ёмкостные параметры, стоящие «перед» аппроксимированными производными, являются взятыми «против потока» и средними значениями одноимённых параметров по области аппроксимирования операторов дифференцирования соответственно.

Приращение времени Δt является переменным и выбирается таким, что максимальное изменение насыщенности первой фазой на последующем временном шаге равно заданной доле от допустимого изменения. Допустимым изменением насыщенности принято изменение последней, при котором итоговое значение насыщенности $S^{(1)}$ либо равно значению остаточной насыщенности этой фазой $S_r^{(1)}$, либо $1 - S_r^{(2)}$.

Таким образом, предложенная схема аппроксимации уравнений (16, 17) является явной, то есть насыщенность первой фазой $S^{(1)}$ на последующем временном шаге определяется явно либо по уже известной насыщенности на текущем временном шаге, либо из начальных и граничных условий.

Описываемый метод решения уравнения (10) предполагается использовать при численном исследовании вторичной миграции углеводородов в естественных геологических системах при воздействии техногенных факторов и без. Гравитационная сила является определяющей для таких объектов и имеет вертикальное направление. Характерные размеры рассматриваемых геологических систем таковы, что в латеральном направлении они на три порядка больше, чем в вертикальном.

На приведённых в предыдущем абзаце аргументах основана предложен-

ная автором работы методика расщепления⁵ решения конечно-разностных уравнений (19, 20), позволяющая значительно снижать машинное время расчётов при исследовании процессов капиллярно-гравитационной сегрегации в отсутствии техногенного воздействия.

Предложенный алгоритм расщепления заключается в том, что при суммировании в уравнениях (19), (20) на каждый временной шаг, кратный определённому числу, не учитывается вертикальная координата.

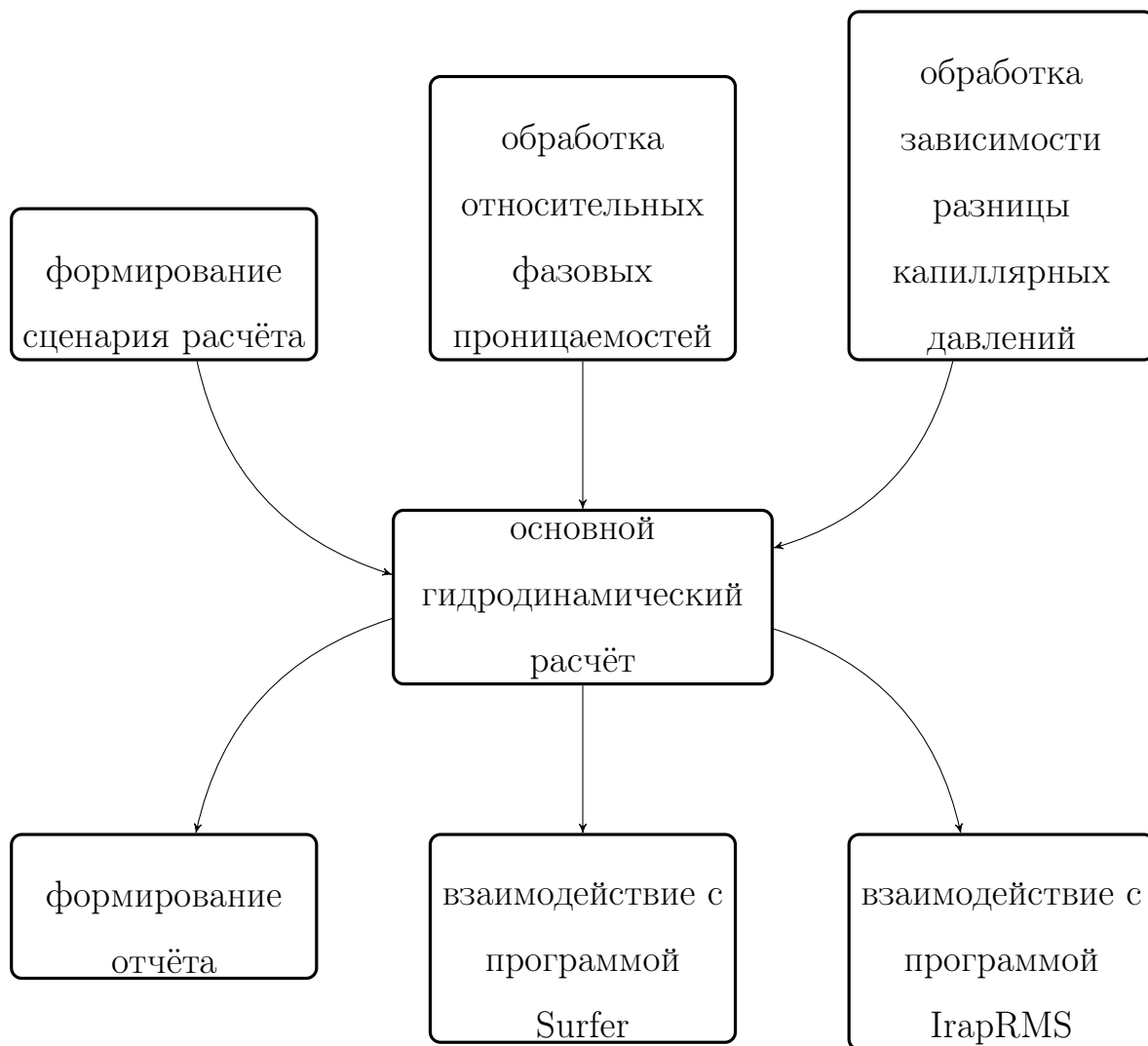


Рис. 1. Структура программного комплекса Saturation.

⁵ Ковеня В. М., Яненко Н. Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981. 304 с.

Автором работы создан программный комплекс Saturation, полностью заключивший в себе все описанные методы решения. Структуру программного комплекса характеризует рис. 1.

Третья глава посвящена анализу результатов моделирования миграции, аккумуляции и перераспределению нефти в модельных геологических пластах. Детально изучается вторичная миграция, а первичная рассматривается гипотетически в форме априорного задания источника нефти от возможных тектонических трещин. Также в третьей главе предложено решение обратной задачи уточнения фильтрационно-ёмкостных параметров, распределения насыщенности пластовыми флюидами и запасов нефтеносных геологических объектов.

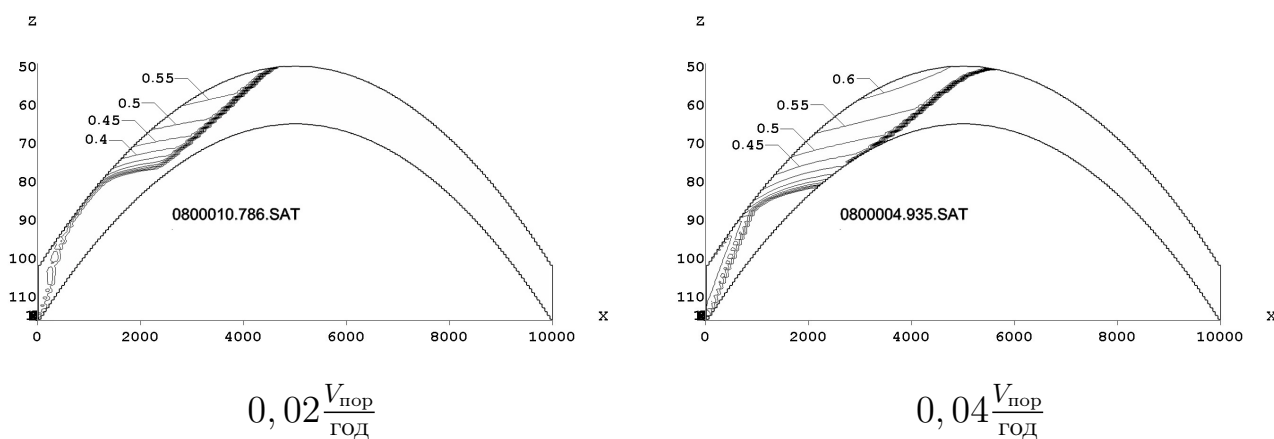


Рис. 2. Насыщенность нефтью, д. ед. Аккумуляция нефти. Разная интенсивность аккумуляции углеводородов. Расчёт на 800 тыс. лет.

В этой главе расчёты проводились на упрощённой двумерной модели (см. рис. 2), размерность сетки которой составляет 200×30 , геометрические параметры одной ячейки соответствуют $50\text{м} \times 1\text{м}$.

Посредством численного моделирования изучается влияние мощности гипотетических источников нефти и неоднородностей фильтрационно-ёмкостных параметров поровой среды на картину миграции углеводородов. В заключительном подразделе приведены соответствующие научные выводы, по-

лученные при анализе расчётов.

В четвёртой главе представлены результаты моделирования нефтенакпления реально существующего нефтеносного геологического пласта, соответствующего юрским отложениям и являющегося объектом разработки (см. рис. 3).

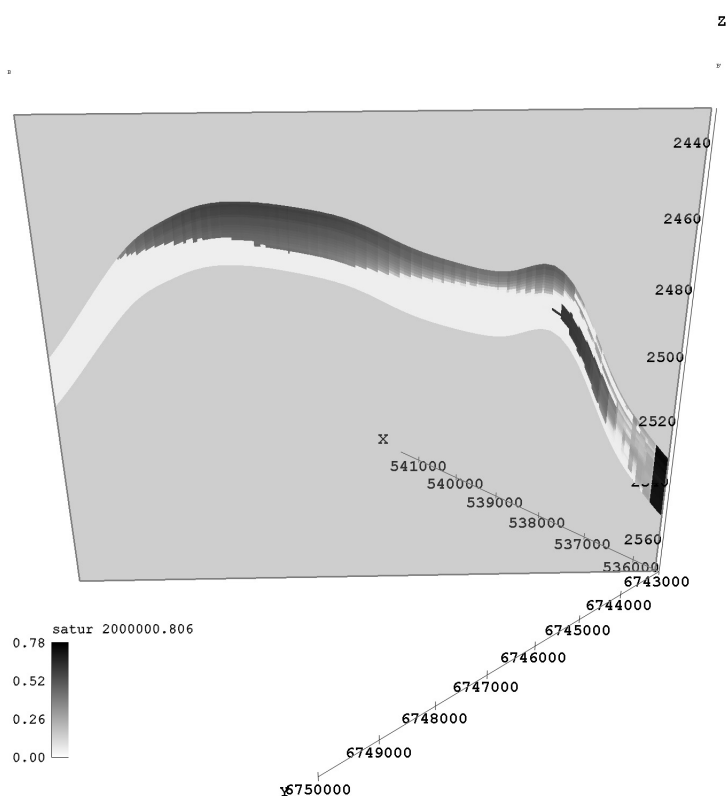


Рис. 3. Насыщенность нефтью, д. ед. Аккумуляция углеводородов. Интенсивность аккумуляции - $0,04 \frac{V_{\text{пор}}}{\text{год}}$. Расчёт на 2000 тыс. лет.

Размерность сетки трёхмерной модели составляет $200 \times 200 \times 20$, геометрические параметры одной ячейки соответствуют $50\text{м} \times 50\text{м} \times 1\text{м}$.

Геометрическая структура и поле пористости соответствуют геофизическим данным, полученным недропользователем в процессе разработки.

Часть расчётов проведена в предположении отсутствия непроницаемых

областей для наглядной демонстрации картины миграции в гидродинамически связанном пласте.

В заключении сформулированы основные выводы, перечислены полученные в данной работе результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Разработана модель миграции, перераспределения и аккумуляции углеводородов в естественных неоднородных геологических коллекторах, основанная на начально-краевой задаче, включающей уравнение Рапопорта-Лиса в трёхмерном случае в допущении сегрегационности характера фильтрационного движения и анизотропии абсолютной проницаемости;
- предложен и обоснован экономичный метод и алгоритмы решения отмеченного нелинейного параболического уравнения в задачах о естественном фильтрационном движении пластовых флюидов в геологических поровых резервуарах под воздействием капиллярных и гравитационных сил;
- создан программный комплекс, основанный на предложенной модели, разработанном методе и алгоритмах, и позволяющий проводить моделирование процессов перераспределения углеводородов с использованием геолого-физической информации на геологических масштабах времени;
- посредством численного моделирования проведено комплексное исследование проблем миграции, аккумуляции и перераспределения нефти, на основании и в рамках которого были сделаны следующие выводы:

1. при естественной миграции углеводородов в геологических масштабах за время порядка 10^2 выполняется условие капиллярно-гра-

- витационного квазиравновесия пластовых флюидов в «вертикальном» направлении, что обеспечивает эффективность применяемого метода расщепления решения численной схемы,
2. влияние анизотропии абсолютной проницаемости на естественное перераспределение углеводородов в рассмотренном диапазоне параметров несущественно,
 3. проведённые численные исследования, основанные на принятых допущениях, показывают, что характерные времена формирования промышленных залежей нефти составляют 10^4 - 10^7 лет,
 4. вследствие малости скорости рассмотренных в работе процессов миграции углеводородов, в рамках принятой модели, месторождения при наличии источников могут непрерывно находиться в состоянии сырьевой подпитки,
 5. значительное влияние на картину аккумуляции нефти, в рамках рассмотренных петрофизических зависимостей, оказывают (в порядке уменьшения влияния) неоднородности абсолютной проницаемости, функции разности давлений в фазах и функции относительных фазовых проницаемостей.

Список публикаций по теме диссертации

1. Журавлёв А. С., Журавлёв Е. С., Шабаров А. Б. Применение трёхмерного уравнения Рапопорта-Лиса в задачах вторичной миграции углеводородов. // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 195–202.
2. Шабаров А. Б., Журавлёв А. С., Журавлёв Е. С. Моделирование мигра-

ции и аккумуляции углеводородов в естественных геологических системах. // Вестник ТюмГУ. Физико-математические науки. 2011. Т. 7. С. 38–45.

3. Шабаров А. Б., Журавлёв А. С. Обратная задача теории фильтрации. // Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: сборник статей. Выпуск 2. 2004. С. 46–53.
4. Журавлёв А. С. Программный комплекс «Cargrav» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617089 от 08.08.2012.
5. Журавлёв А. С. Программный комплекс «Saturation». // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617090 от 08.08.2012.
6. Журавлёв А. С. Программный комплекс «Potential». // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613688 от 15.04.2013.
7. Журавлёв А. С., Шабаров А. Б. Адаптация геолого-фильтрационной модели углеводородной залежи на основе постановки и решения обратной задачи подземной гидродинамики. // IV научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов нефтяной и геолого-разведочной отрасли ХМАО. Сборник тезисов докладов. 2003. С. 73–76.

Подписано в печать 22.04.2013. Тираж 100 экз.

Объем 1,0 уч. изд. л. Формат 60x84/16. Заказ 299.

Издательство Тюменского государственного университета
625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 10. Тел./факс (3452) 46-27-32

E-mail: izdatelstvo@utmn.ru